

Interreg



Cofinancé par
l'Union Européenne
Cofinanziato
dall'Unione Europea



France – Italia ALCOTRA



[http://www.esa.int/spaceimages/Images/2019/03/The Alps](http://www.esa.int/spaceimages/Images/2019/03/The_Alps)

WP 3.3 – LIVRABLE 162795



DONNEES SATELLITAIRES D'ECLAIREMENT SOLAIRE : POTENTIELS POUR L'AMELIORATION DE LA MODELISATION DE L'OZONE ET APPLICATION A LA REGION ALCOTRA.

ALP'AERA – Ref. CTE 20161

Référence du livrable : 162795

Auteurs du document:

Beaumont Julien – Atmo Auvergne Rhône Alpes

Harry Dupont – Atmo Auvergne Rhône Alpes

Cozic Julie – Atmo Auvergne Rhône Alpes

Version du document: 1

Date de réalisation de la version finale du document: Aout 2024

FINANCEMENT

Cette étude a été rendue possible grâce à l'aide financière particulière des membres suivants/Questo studio è stato reso possibile grazie al particolare sostegno finanziario dei seguenti membri: :

Pour l'ensemble des partenaires/Per tutti i partner :



France – Italia ALCOTRA

En complément pour Atmo Auvergne-Rhône-Alpes/Ulteriori informazioni per Atmo Auvergne-Rhône-Alpes :



SOMMAIRE

1. Introduction	7
1.1 L'Ozone.....	7
1.2 Le rayonnement Solaire	8
1.2.1 Les mesures au sol	9
1.2.2 Les données satellitaires	10
1.2.3 Le rayonnement dans les modèles numériques de prévision	13
1.2.4 La chaîne de modélisation WRF-CHIMERE.....	13
1.2.5 Problématique et objectif de l'étude	14
2. Résultats.....	17
2.1 Comparaison rayonnement solaire WRF et SARA3.....	17
2.2 Comparaison de la modélisation de l'ozone (modèle CHIMERE)	18
2.3 Comparaison modèles/mesures	21
3. Discussions	25
4. Résumé et Conclusion.....	28

RESUME

Cette étude a consisté en l'évaluation du potentiel d'utilisation des données satellitaires de rayonnement solaire pour la modélisation de l'ozone (O₃) en région ALCOTRA. L'ozone est un gaz irritant, nocif pour les voies respiratoires, et est le seul polluant réglementé dont la concentration moyenne ne baisse pas aux cours des dernières années. La

formation d’ozone dans la basse atmosphère résulte de réactions chimiques complexes qui impliquent la présence d’espèces chimiques dénommées précurseurs et qui dépend des conditions météorologiques, dont le rayonnement solaire nécessaire à la dissociation photochimique qui mène à la formation d’ozone. Une modélisation fiable de la distribution de la concentration d’O₃ nécessite donc une bonne représentation de la variabilité spatiale et temporelle du rayonnement solaire, ce qui peut être obtenu grâce aux données satellitaires. Le potentiel des données satellites pour la modélisation de l’O₃ a donc été évalué dans cette étude via l’utilisation de la base de données de rayonnement solaire satellitaire SARAH-3¹ en lieu et place des données de rayonnement solaire habituellement fournie par le modèle météorologique WRF². Dans notre configuration de grille à 9 km de résolution horizontale comprenant la zone ALCOTRA, le rayonnement du modèle WRF montre une surestimation systématique du rayonnement solaire d’environ 20 à 40% selon les saisons par rapport aux données SARAH-3 pour la zone et l’année d’étude (2015). L’utilisation du rayonnement solaire SARAH-3 (à la place de celui issu du modèle WRF) pour forcer le modèle de chimie-transport CHIMERE³ a engendré une baisse limitée de la concentration moyenne d’ozone en journée, évaluée via le calcul du MDA8 (maximum journalier sur une moyenne de 8h glissantes), d’environ -0.8 µg.m⁻³ (~0.8%). Localement, cette baisse est plus marquée, comme dans la Plaine du Pô ou à proximité de certaines grandes agglomérations italiennes (1.5 à 2 µg.m⁻³). L’apport de l’utilisation des données satellites de rayonnement solaire a été évalué de façon objective à l’aide de comparaisons modèles-mesures avec des données issues de stations de l’ensemble de la Région ALCOTRA. L’évaluation suggère aucune amélioration significative des scores aux stations (biais, RMSE, corrélation,) suite à l’utilisation de données satellitaires et n’incite pas à développer des méthodes plus complexes pour intégrer les données de rayonnement solaire satellitaire pour améliorer la représentation et les prévisions des concentrations d’O₃. Dans cette étude, nous avons également mis en évidence que la concentration en ozone dans les régions avec de plus fortes concentration de précurseurs, telles que la Plaine du Po, montrent une plus forte sensibilité (corrélation) aux variations des conditions météorologiques telles que le rayonnement solaire, ce qui est une incitation supplémentaire à la diminution des émissions de précurseurs d’ozone.

¹ https://www.cmsaf.eu/EN/Highlights/Dokumente/News_38.html

² <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>

³ <https://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>

1. Introduction

1.1 L'Ozone

L'ozone (O₃) de surface est un gaz irritant pour les voies respiratoires, ce qui peut causer ou aggraver l'asthme ainsi que d'autres maladies pulmonaires (OMS, 2008). Le nombre de décès prématurés annuel associé à une exposition de longue durée à l'ozone, évalué pour la France, se chiffre entre 3100 (EEA, rapport Qualité de l'Air en Europe, 2022a) et 6000 (Orru et al., 2019) et pour l'Italie, entre 5100 et 8300, toujours selon les mêmes sources. L'ozone impacte aussi le développement et la vie des espèces végétales. L'absorption en grande quantités de molécules d'O₃ au niveau des stomates des plantes cause le jaunissement des feuilles et le dépérissement des plantes ce qui impacte négativement les rendements agricoles ainsi que la biodiversité. Les pertes de rendement agricoles pour le blé (évaluées à environ 6 à 8% pour l'année 2019) représentent des pertes économiques évaluées à 350 millions d'€ pour la France et 35 millions d'€ pour l'Italie (EEA, rapport Qualité de l'Air en Europe, 2022b). Par ailleurs, l'ozone est le seul polluant atmosphérique dont la concentration ne baisse pas au cours des quinze dernières années dans la plupart des régions de France ou d'Italie, et même d'Europe. De faibles augmentations de la moyenne annuelle sont reportées tandis que les pics d'ozone sont généralement à la baisse (Solberg et al., 2021).

L'ozone est présent naturellement dans la haute atmosphère (stratosphère) où il joue un rôle capital de filtre du rayonnement UV et dans la basse atmosphère (troposphère) où il est un gaz à effet de serre et polluant atmosphérique qui nuit à la santé humaine et aux écosystèmes. Or sa concentration depuis l'ère préindustriel a été multipliée environ par 3 dans la basse atmosphère. L'ozone troposphérique est un polluant dit « secondaire », car sa formation dépend de la présence de composés appelés précurseurs d'ozone. Parmi ces précurseurs, on retrouve principalement les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COVs). Les émissions d'oxydes d'azotes sont en très grandes majorités d'origine humaine et associées à la combustion de produits pétroliers. Certains composés organiques volatils sont également émis majoritairement par les activités humaines (ex : méthane, composés issus des solvants et peintures, etc...). La végétation émet également de grande quantité de COVs (ex : isoprène, mono-terpène, limonène...) notamment lorsqu'elles sont soumises à des stress hydriques (ex : Monks et al., 2015). Ces COVs émis naturellement par les plantes sont appelés COVs biogéniques et peuvent représenter

jusqu'à 70% des COV totaux en masse émis dans certaines régions (ex: Région Auvergne-Rhône-Alpes).

La quantité d'ozone formée dépend de cycles de réactions dont certaines mettent en jeu des processus photochimiques. Le potentiel de formation d'ozone ne varie pas linéairement avec la concentration de précurseurs présents dans l'atmosphère mais dépend également du type de régime chimique qui est défini par les rapports de concentration des différents types de précurseurs, principalement NO_x et COVs. La formation d'ozone est également fortement influencée par les conditions météorologiques : la présence de rayonnement solaire (ultra-violet) est indispensable pour initier la dissociation photochimiques des molécules de dioxygène (O₂) ou de dioxyde d'azote (NO₂) qui mènent à la formation d'O₃, les températures élevées favorisent les émissions de certains précurseurs d'ozone notamment les COVs biogéniques (Langner et al., 2012) et enfin le taux d'humidité présent dans l'atmosphère influence l'efficacité des puits d'ozone dans l'atmosphère (Colette et al., 2015) ou à la surface des plantes (Szopa et al., 2021).

1.2 Le rayonnement Solaire

Le rayonnement ou éclaircissement solaire représente la quantité moyenne (représentée comme un flux) de rayonnement issu de la partie visible du spectre solaire, de 290 à 3000 nm, qui atteint la surface après son interaction avec les molécules gazeuses, l'eau des nuages (vapeur, liquide, glace) ou les particules solides (aérosols) présents dans l'atmosphère. Plus précisément l'éclaircissement solaire incident au sol, ou DSSI en anglais (Downwelling Surface Solar Irradiance) est décrit comme la somme des flux issus du rayonnement direct et diffus décrit dans la Figure 1.

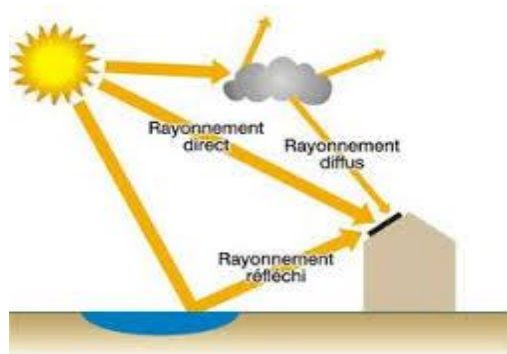


Figure 1 Schéma illustrant les composantes directes et diffuses du rayonnement solaire arrivant sur une surface plane.

Source : <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/enseillement-d8/>

Au cours des dernières décennies, la baisse de la pollution particulaire dans l’atmosphère dans de nombreuses régions d’Europe a engendré une augmentation du rayonnement solaire arrivant à la surface.

1.2.1 Les mesures au sol

La mesure du rayonnement solaire au sol dans les stations météorologiques conventionnelles s’effectue à l’aide d’instrument dénommés pyranomètre (voir Figure 2).



Figure 2 : Photo illustrant un pyranomètre solaire installé en milieu montagneux. Source :

<https://www.essearch.com/delta-t-spn1-pyranometer-in-australia/>

Ceux-ci sont constitués d’un hémisphère en verre et d’une cellule qui convertit l’énergie reçue sous forme de rayonnement en un courant électrique dont l’intensité peut être mesurée. Cependant, le dépôt de poussières, de givre ou de neige à la surface de l’hémisphère en verre constituant le capteur peut entacher grandement la qualité de la mesure, ce qui nécessite un entretien manuel régulier. Le maintien d’un réseau de mesure de rayonnement solaire de qualité est donc onéreux, ce qui peut expliquer en partie la

faible densité spatiale des stations disposant de mesures de rayonnement solaire fiable, en particulier celles disposant d'un enregistrement sur de longues périodes.

1.2.2 Les données satellitaires

La donnée satellitaire permet d'obtenir une estimation indirecte du rayonnement reçu à la surface, notamment à partir de la mesure du rayonnement réfléchi par cette surface. La mise en service de satellites géostationnaires permet l'obtention de base de données dont la fréquence de mesure est horaire voir infra horaire, dont la résolution horizontale est de quelques kilomètres et dont la longueur d'enregistrement est maintenant de plusieurs décennies (début des années 1980).

Cette étude a été menée à l'aide de la base données SARA-3 (Pfeifroth *et al.*, 2023) mise à disposition par le CM-SAF. Elles sont disponibles à une résolution horizontale de 5.5° (environ 5 km), à une fréquence de 30 minutes et couvrent la période allant de 1983 à aujourd'hui. L'algorithme qui permet d'estimer la quantité de rayonnement solaire arrivant au sol se base sur les réflectances mesurées dans le domaine du spectre visible et leurs variations minimales et maximales en un point donné au cours de chaque mois de l'année, ce qui permet d'obtenir l'albédo effectif des nuages (capacité des nuages à réfléchir le rayonnement solaire). L'albédo effectif des nuages représente le rapport entre le rayonnement solaire arrivant réellement à la surface et le rayonnement solaire attendu au même endroit et un même instant par ciel clair. Ce rayonnement solaire attendu par ciel clair est modélisé à l'aide d'un modèle de transfert radiatif (SPECMAGIC) qui représente les interactions entre le rayonnement solaire (absorption, diffusion...) et les différents composés gazeux présents dans l'atmosphère. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère et la colonne totale d'ozone, celles-ci sont fournies par les réanalyses ERA-5 (Hersbach *et al.*, 2020).

Malgré des améliorations apportées à la détection de la présence de manteau neigeux dans la dernière version de l'algorithme SARA-3, il est à signaler que l'estimation du rayonnement solaire arrivant à la surface en région montagneuse est sujette à des incertitudes supplémentaires en raison de la difficulté de discriminer la présence de nuage bas de celle d'un manteau neigeux et de l'ombre portée de certains massifs montagneux sur la surface. Néanmoins, il a été démontré que les données satellites de rayonnement solaire sont de qualité suffisante pour servir de référence afin d'évaluer les modèles numériques de prévisions (Yang et Perez., 2019).

Les variations mensuelles ainsi que la tendance pour l'ensemble de la période 1983-2022 pour la région ALCOTRA estimées à partir de la base de données SARAH-3 sont présentées sur la Figure 3.

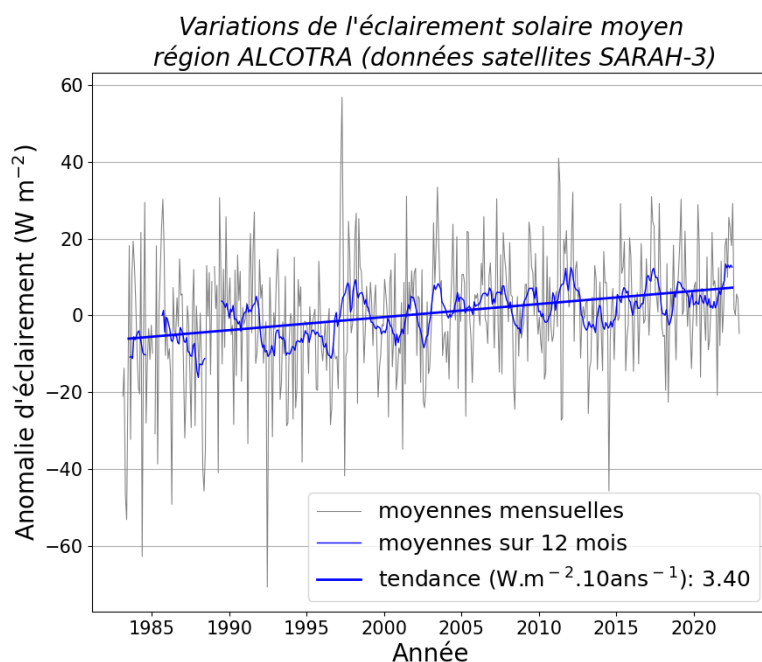


Figure 3 : Moyennes mensuelles et moyennes glissantes sur 12 mois de l'éclairement solaire pour la région ALCOTRA estimé à partir de la base de données SARAH—3 pour la période 1983-2022. La régression et la valeur de la tendance ont été obtenues à partir d'une régression de Theil-Sen.

Conformément aux résultats d'études antérieures, on trouve pour la région ALCOTRA une tendance positive significative de $+3.4 \text{ W.m}^{-2} \cdot 10\text{ans}^{-1}$, qui peut en grande partie s'expliquer par la baisse de la pollution particulaire. La valeur de la tendance a été obtenue à partir d'une régression de Theil-Sen afin de limiter la sensibilité du résultat aux valeurs extrêmes. La variabilité spatiale de cette tendance sur le l'éclairement solaire à l'échelle de la région ALCOTRA est également présentée à la Figure 4.

**Tendance éclaircissement solaire :
SARAH-3 (1983-2022)
Région ALCOTRA**

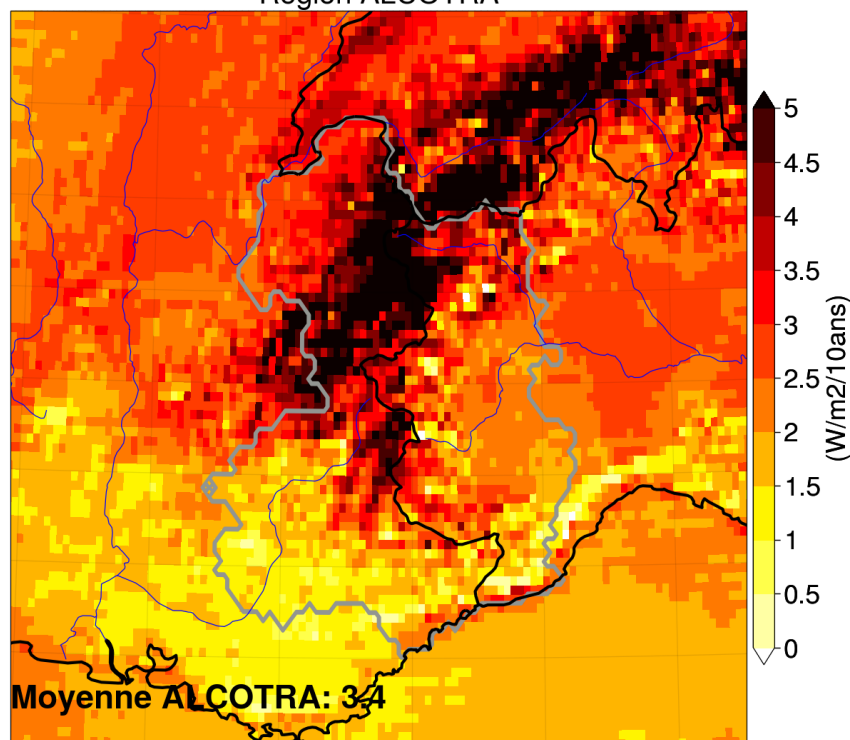


Figure 4 : Valeur en chaque point de grille de la base de données SARAH-3 de la tendance ($W.m^{-2}.10ans$) d'éclaircissement solaire sur la période 1983-2022. La valeur de la tendance a été obtenue à l'aide d'une régression de Theil-Senn.

De manière générale, on retrouve les tendances les plus importantes au niveau des zones de haute montagne (jusque $+5 W.m^{-2}.10ans^{-1}$), ce qui suggère que la valeur de ces tendances sont possiblement influencées par la présence de neige (et la tendance à la baisse du manteau neigeux) et incite à prendre avec précautions les valeurs de tendances issues de la base de données SARAH-3 sur les zones de haute montagne. La hausse du rayonnement solaire en Europe sur la période considérée est en effet généralement largement attribuée à la baisse de la pollution particulaire (Nabat *et al.*, 2014). Or, il a été démontré que cette baisse de la pollution particulaire a un impact *a priori* plus important sur les vallées et zones de basses altitudes plutôt que sur les zones de haute montagne (Philipona, 2013). Au sein de la région ALCOTRA, on constate également un gradient nord-sud sur les tendances de rayonnement solaire avec, hors zone de haute montagne, généralement une tendance plus élevée sur la partie nord du domaine ALCOTRA.

1.2.3 Le rayonnement dans les modèles numériques de prévision

Dans les modèles atmosphériques, l'estimation du rayonnement solaire arrivant à la surface du sol est une variable importante pour les prévisions météorologiques (et les projections climatiques). Cette estimation se fait à l'aide d'un modèle de transfert radiatif. Les interactions entre le rayonnement solaire et les différents composés qui constituent l'atmosphère par ciel clair sont pris en compte. Ces modèles représentent également les interactions (réflexion, absorption) entre le rayonnement solaire avec l'eau des nuages (liquide ou solide) et les aérosols. La distribution spatiale et temporelle des particules des nuages et des aérosols est représentée à l'aide des modules physiques et dynamiques composant le modèle atmosphérique. Vu que l'ensemble des processus physiques menant à la formation des nuages n'est pas représenté de façon explicite et vu que la résolution horizontale et verticale de ces modèles est à une échelle beaucoup moins fine que celle des processus menant à la formation des nuages, cette représentation de la distribution de l'eau des nuages, de sa phase (liquide ou solide), de la taille des particules est sujette à de nombreuses incertitudes ou imprécisions, ce qui implique donc nécessairement des erreurs sur l'estimation du rayonnement solaire arrivant à la surface.

1.2.4 La chaîne de modélisation WRF-CHIMERE

La chaîne de modélisation WRF-CHIMERE utilisée dans cette étude est couramment utilisée dans les AASQA en France comme Atmo AuRA ou encore AtmoSUD afin de fournir des prévisions en temps réel et de scénarisation de la qualité de l'air. Le modèle atmosphérique WRF est ici utilisé dans une configuration avec un premier domaine d01 à une résolution horizontale de 27km et un second domaine d02 de résolution 9km qui comprend l'ensemble de la Région ALCOTRA (voir Figure 5).

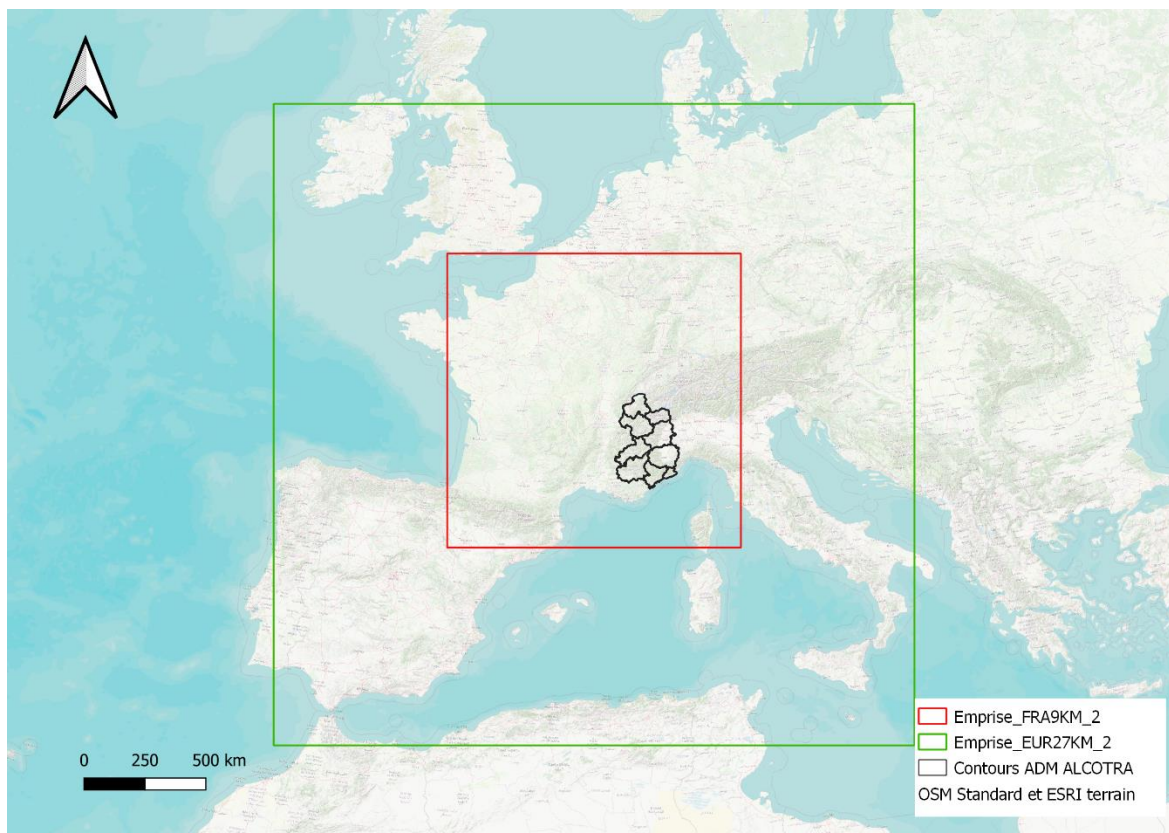


Figure 5 : Configuration des domaines de calculs WRF et CHIMERE. En vert le domaine d01 à 27km de résolution et en rouge le domaine d02 à 9km de résolution (projection en Lambert Conic Conformal)

Les analyses du modèle global de prévision GFS à une résolution horizontale de 0.5° sont utilisées comme conditions de bords pour le modèle WRF. Le schéma de transfert radiatif Dudhia ($ra_sw_physics=1$) est activé dans cette étude et permet d’obtenir l’estimation du rayonnement solaire arrivant à la surface.

Le modèle de chimie-transport CHIMERE nécessite en entrée les conditions météorologiques fournies par le modèle WRF. Il nécessite également des données d’émissions de polluants anthropiques qui sont fournies par le cadastre (v73) d’Atmo Auvergne-Rhône-Alpes pour le territoire de cette région et par le cadastre d’émission européen CAMS pour les régions situées en dehors. Les domaines d’intégration sont les mêmes que pour le modèle WRF et la version du modèle utilisée est la 2020r3.

1.2.5 Problématique et objectif de l’étude

Nous avons vu dans l’introduction que l’ozone troposphérique impacte la santé humaine et la biodiversité et qu’il est le seul polluant atmosphérique réglementé dont la

concentration ne baisse pas au cours des dernières années. En France, l’ozone fait d’ailleurs l’objet d’un plan de réduction et d’amélioration des connaissances au sein de la Région Auvergne-Rhône-Alpes. La prévision (survenue de pics en été) et la scénarisation des quantités d’O₃ présente dans l’atmosphère nécessite une bonne représentation des conditions météorologiques, entre autres, celle du rayonnement solaire. Or, l’estimation du rayonnement solaire en surface est généralement issue des sorties de modèles atmosphériques, et souffre de nombreuses incertitudes. Dans ce contexte, nous allons évaluer quel peut être le potentiel et l’apport des données satellitaires, à *priori* plus fiables pour l’estimation du rayonnement solaire que les modèles atmosphériques (les données satellitaires peuvent être utilisées pour évaluer les modèles atmosphériques d’après Yang et Perez., 2019), pour la modélisation de l’ozone en Région ALCOTRA.

Pour ce faire, deux expériences de modélisation ont été menées à l’aide de la configuration décrite dans la section 1.2.4 :

- Une première simulation dite de REFERENCE, dans laquelle les conditions météorologiques sont fournies au modèle CHIMERE de façon conventionnelle par le modèle WRF.
- Une seconde simulation dite de SCENARIO, dans laquelle le rayonnement solaire issu du modèle WRF a été remplacé par le rayonnement satellitaire SARA3 dans les fichiers de sorties. Les autres conditions de calcul du modèle CHIMERE sont les mêmes que pour la simulation de REFERENCE. Cette simulation permettra d’estimer l’impact de la modification du rayonnement seul dans le modèle CHIMERE.

Pour effectuer ce travail de modification du rayonnement solaire dans les sorties WRF par les données satellites, les données SARA3 (~5.5 kms) ont été interpolées vers les domaines d’intégration WRF d01 (27 kms) et d02 (9 kms) à l’aide d’une méthode d’interpolation conservative de la moyenne ce qui est généralement recommandé lors d’interpolation vers des résolutions plus basses.⁴

La simulation des conditions météorologiques avec le modèle WRF a été effectuée pour l’ensemble de l’année 2015. La comparaison entre le rayonnement solaire issu du modèle WRF (domaine d02) et les données SARA3 pour la région ALCOTRA est présentée à la section 2.1. Cette comparaison permet notamment de mieux interpréter les différences en termes de modélisation de l’ozone dans les simulations CHIMERE REFERENCE et SCENARIO

⁴ Fonction Regridder du package Python xesmf, avec méthode « conservative » :
https://xesmf.readthedocs.io/en/latest/notebooks/Compare_algorithms.html

présentées pour la période d’avril à septembre 2015 (période où l’ozone est le plus nocif pour la santé humaine et la végétation) à la section 2.2. Enfin, la comparaison modèles/mesures aux stations de la région ALCOTRA, afin d’évaluer l’impact en termes de scores aux stations pour la modélisation de l’ozone, est présentée à la section 2.3.

2. Résultats

2.1 Comparaison rayonnement solaire WRF et SARAH-3

Les cartes de différence entre le rayonnement solaire modélisé par le modèle WRF et le rayonnement solaire SARAH-3 par saisons météorologiques (DJF=Décembre-Janvier-Février, MAM=Mars-Avril-Mai, JJA=Juin-Juillet-Août) sont présentées à la Figure 6.

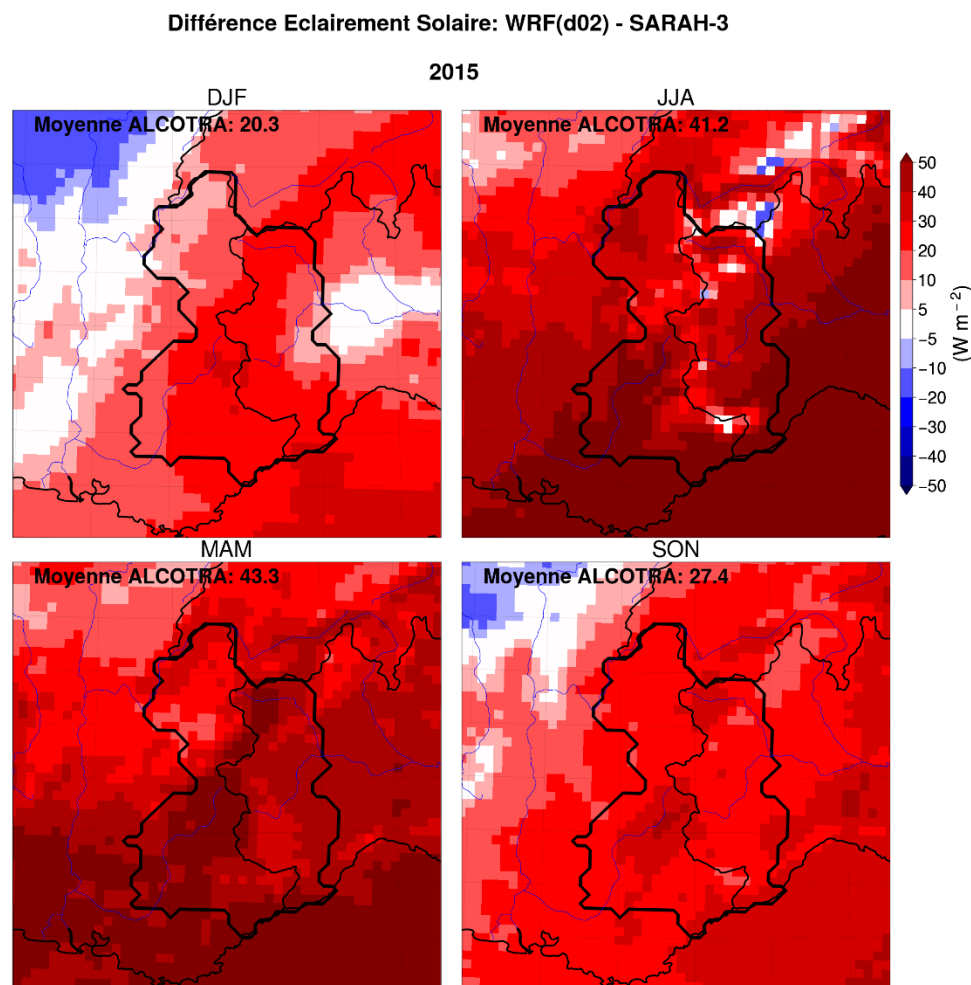


Figure 6 : Différence de l'éclairement solaire (W.m-2) issu modèle WRF (domaine d'intégration d02, 9km) et les données satellitaires SARAH-3 pour l'année 2015. Les contours de la Région ALCOTRA sont indiqués en noir.

La modélisation du rayonnement solaire par le modèle WRF sur le domaine d02 à 9km de résolution surestime systématiquement et en toutes saisons par rapport au rayonnement solaire issu des données satellitaires SARAH-3. Cette observation est valable pour l'ensemble de la Région ALCOTRA et les régions méditerranéennes en général. Ces différences sont en absolu plus importantes au printemps et été, environ +40 W.m⁻² en

moyenne pour la région ALCOTRA au cours de ces saisons, contre +20 W.m⁻² en hiver. En termes relatif, cela représente cependant une part plus importante du rayonnement moyen en hiver, soit environ +35% contre environ +15% en été pour la zone ALCOTRA. Le cycle moyen journalier pour le rayonnement solaire par saison est présenté à la Figure 7. La différence entre la modélisation du rayonnement par WRF (domaine d02) et les données satellitaires est maximale à la mi-journée (autour de 12h UTC).

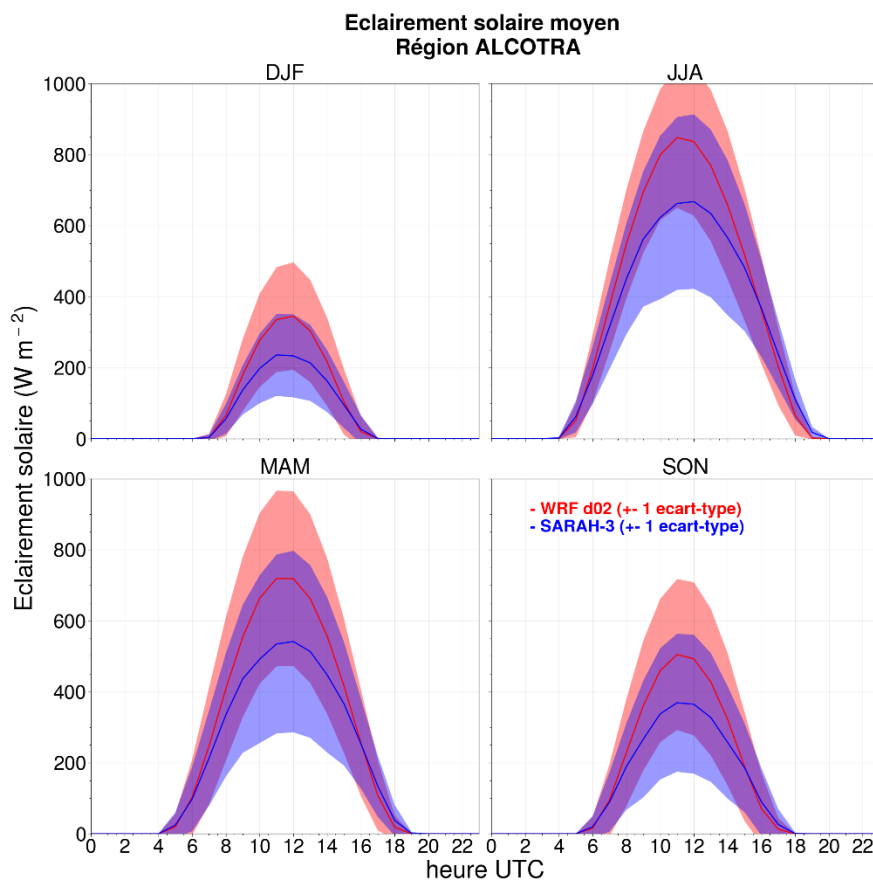


Figure 7 : Cycle journalier moyen de l'éclairement solaire (W.m-2) pour le modèle WRF (rouge) et les données satellitaires SARA3 (bleu) pour l'année 2015, par saison. Les données interpolées sur la grille du domaine d02 à 9km sont moyennées sur le territoire de la Région ALCOTRA. Les zones ombragées correspondent à l'intervalle ± 1 écart-type.

2.2 Comparaison de la modélisation de l'ozone (modèle CHIMERE)

Dans cette section, nous présentons les différences de concentration en ozone modélisé entre la simulation CHIMERE REFERENCE forcée par les conditions météorologiques du modèle WRF et la simulation SCENARIO où le rayonnement solaire du modèle WRF a été remplacé par le rayonnement issu des données satellitaires SARA3. La comparaison a été effectuée sur l'année 2015 et pour la période allant du 01^{er} avril au 30 septembre, qui est

classiquement la période référence pour étudier l’ozone, car il s’agit de la période à laquelle l’ozone est le plus susceptible d’affecter la santé humaine et la biodiversité (ex: Otero *et al.*, 2018 ; Oikonomakis *et al.*, 2018). Etant donné que le remplacement du rayonnement solaire modélisé par le rayonnement solaire satellitaire est surtout susceptible d’impacter la modélisation de l’ozone en journée, les deux simulations sont comparées après le calcul du MDA8 (maximum journalier de la moyenne de la concentration en ozone sur 8 heures glissantes), qui est un indice fréquemment utilisé pour évaluer les concentrations en ozone. Le MDA8 est calculé pour chaque journée et est ensuite moyenné sur l’ensemble de saison d’ozone (avril-septembre 2015).

La carte de la différence de concentration en ozone (MDA8 moyen en $\mu\text{g.m}^{-3}$) entre la simulation SCENARIO et la simulation REFERENCE est présentée à la Figure 8. Le remplacement du rayonnement solaire WRF par le rayonnement SARA3-3 engendre une baisse généralisée de la concentration en O_3 modélisée (MDA8 moyen), ce qui est cohérent car le rayonnement solaire WRF est nettement plus élevé que le rayonnement solaire SARA3-3 (section 2.1) et que de fortes valeurs de rayonnement solaire favorisent la formation d’ozone. A l’échelle de la région ALCOTRA, cette différence est minime car elle représente $-0.8 \mu\text{g.m}^{-3}$, ce qui représente environ 0.8% de la valeur moyenne du MDA8 modélisé au cours de cette saison. Localement, ces différences peuvent être plus importantes comme sur la Plaine du Pô, où l’on observe généralement des différences de l’ordre de 1 à 2 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Ces différences sont même localement proches, voire supérieures à 2 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (1.5 à 2% du MDA8 moyen) à proximité des grandes agglomérations italiennes (Turin, Milan, Gênes...). En France, les différences de MDA8 modélisés les plus importantes (environ 1 $\mu\text{g.m}^{-3}$) apparaissent dans les vallées (vallées du Rhône, vallées Alpines/sillon Alpin, basse vallée de la Durance), et à proximité de certaines grandes agglomérations de la Région PACA (Marseille, Nice, Toulon). Outre, des différences spatiales, des différences temporelles apparaissent également dans la simulation, ainsi la journée où la différence de MDA8 moyen est la plus importante a été recherchée : il s’agit du 21 juillet 2015, avec une différence de 5 $\mu\text{g.m}^{-3}$ à l’échelle de la zone ALCOTRA. La carte de différence de MDA8 moyen pour cette journée est présentée à la Figure 9. Cette journée était caractérisée par une crête anticyclonique mobile issue de l’anticyclone des Açores qui amenait un flux de sud-ouest chaud sur les Alpes avec des températures maximales de +35°C à Turin, +37°C à Chambéry et +30°C à Nice. A l’arrière de cette crête, des averses orageuses se sont développées, gagnant localement les Alpes du Nord la soirée du 21 et l’ensemble des Alpes, tout en s’intensifiant (70mm à Chambéry) ensuite, lors de la soirée du 22/07.

**Diff. MDA8 CHIMERE :
Scénario - Référence**

Avril-Septembre 2015

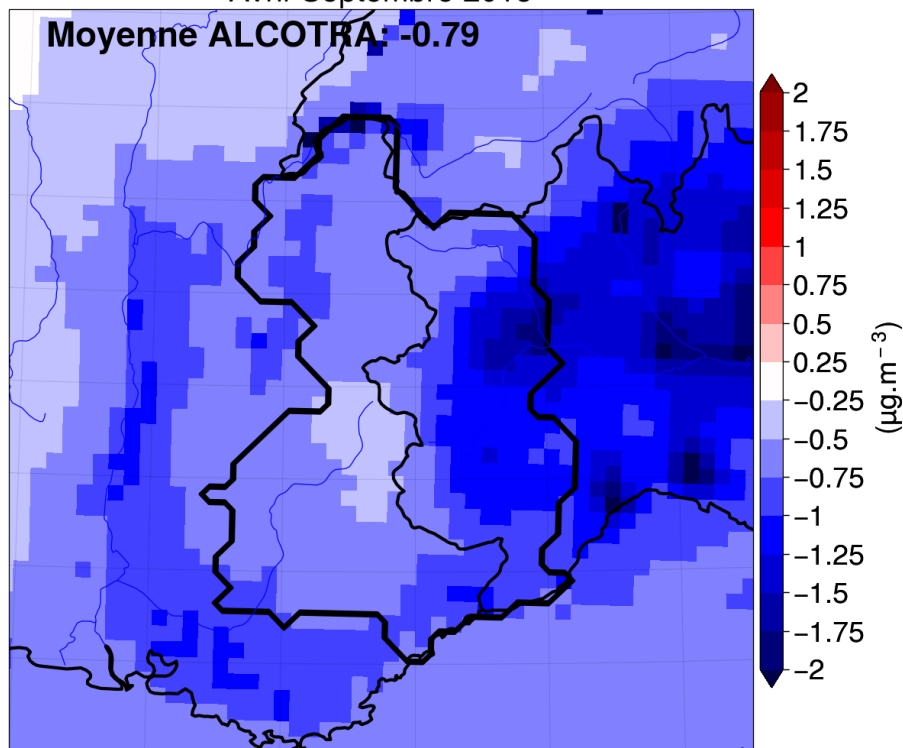


Figure 8 : Différence pour le MDA8 moyen ($\mu\text{g.m}^{-3}$) de la saison d'ozone (avril-septembre 2015) entre la simulation SCENARIO (remplacement du rayonnement solaire WRF par SARAH-3) et la simulation REFERENCE. Les contours de la région ALCOTRA sont indiqués en noir.

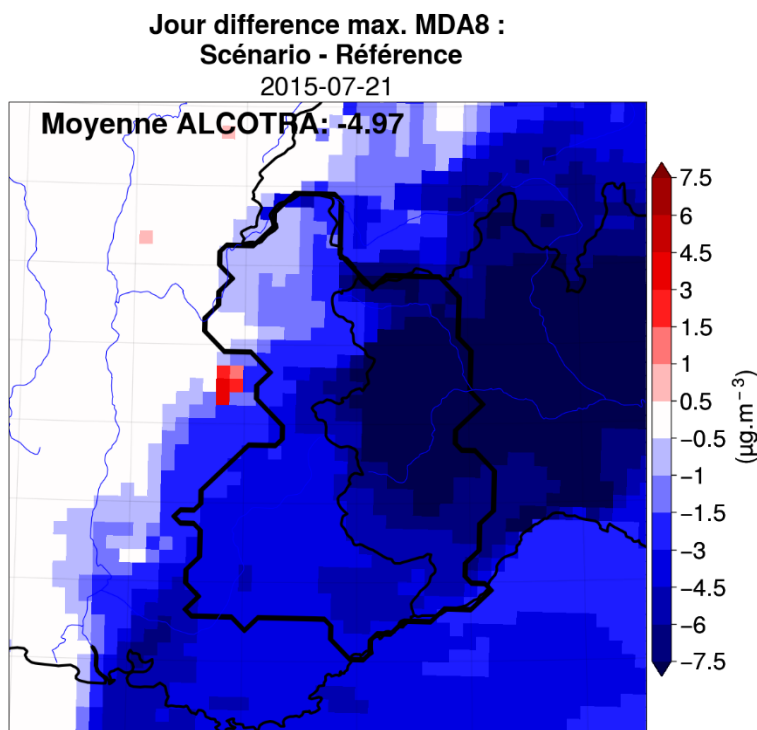


Figure 9 : Journée (21 juillet 2015) avec différence maximale du MDA8 journalier ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) lors de la saison d’ozone (avril-septembre 2015) entre la simulation SCENARIO (remplacement du rayonnement solaire WRF par SARAH-3) et la simulation REFERENCE. Les contours de la région ALCOTRA sont indiqués en noir.

2.3 Comparaison modèles/mesures

Pour comparer les simulations par rapport aux mesures, l’ensemble du réseau de stations de référence de mesure de l’ozone présent sur la région ALCOTRA et géré par les partenaires du projet ALPAERA a été utilisé (voir Figure 10). Toutes les stations qui ont mesuré des concentrations pendant l’année 2015 ont été utilisées à l’exception des stations de typologie « Industrielle » et « Trafic ». En effet, ce type de typologie est couramment écartée des comparaisons entre des modèles méso-échelles et la mesure car leur représentativité très locale ne peut être rendue compte à des échelles de résolution supérieures à $\sim 1\text{km}$ (ici 9km).

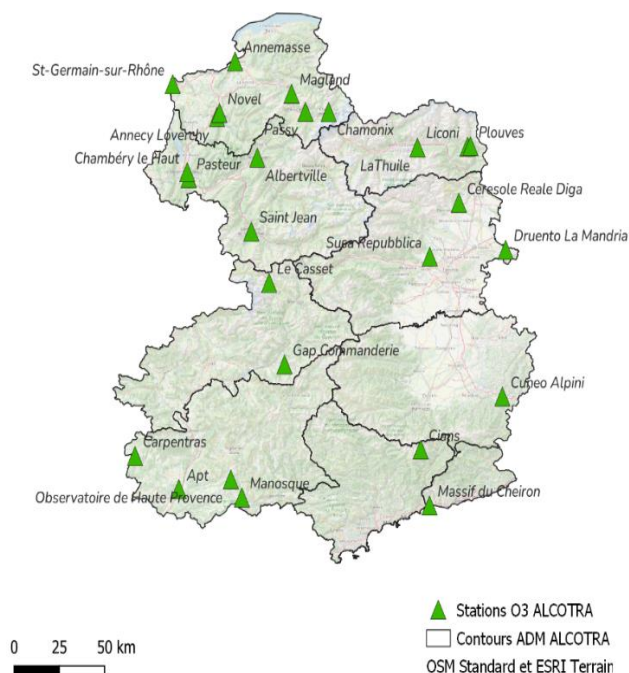


Figure 10 : Réseau de mesure de l’ozone de l’année 2015 des agences ARPA Liguria, ARPA Piemonte, ARPA Val d’Aoste, Atmo SUD et Atmo AuRA sur le territoire ALCOTRA pour l’année 2015

La comparaison entre les valeurs aux stations et celles des points de grille correspondants (plus proche voisin) pour les simulations REFERENCE et SCENARIO est présentée à la Figure 11. Sur le graphique, sont présentées les moyennes mensuelles pour la période avril-septembre 2015 par agence (AASQA⁵ et ARPA⁶). Les différences entre la simulation REFERENCE et SCENARIO semblent les plus importantes au niveau des stations du réseau d’ARPA Piémont et ARPA Val d’Aoste au cœur de l’été (juillet et août). Dans ces cas très précis, l’introduction du rayonnement solaire satellitaire SARAH-3 a possiblement très légèrement amélioré la modélisation de l’ozone aux stations (diminution du biais). Ailleurs, les différences entre les deux simulations sont faibles et l’on n’observe pas d’améliorations.

⁵ Association Agréée de Surveillance de La Qualité de l’air : désigne dans ce projet Atmo Auvergne Rhône Alpes et Atmo Sud

⁶ Agenzia Regionale Protezione Ambiente : désigne dans ce projet ARPA Val d’Aoste, ARPA Ligurie, ARPA Piemont

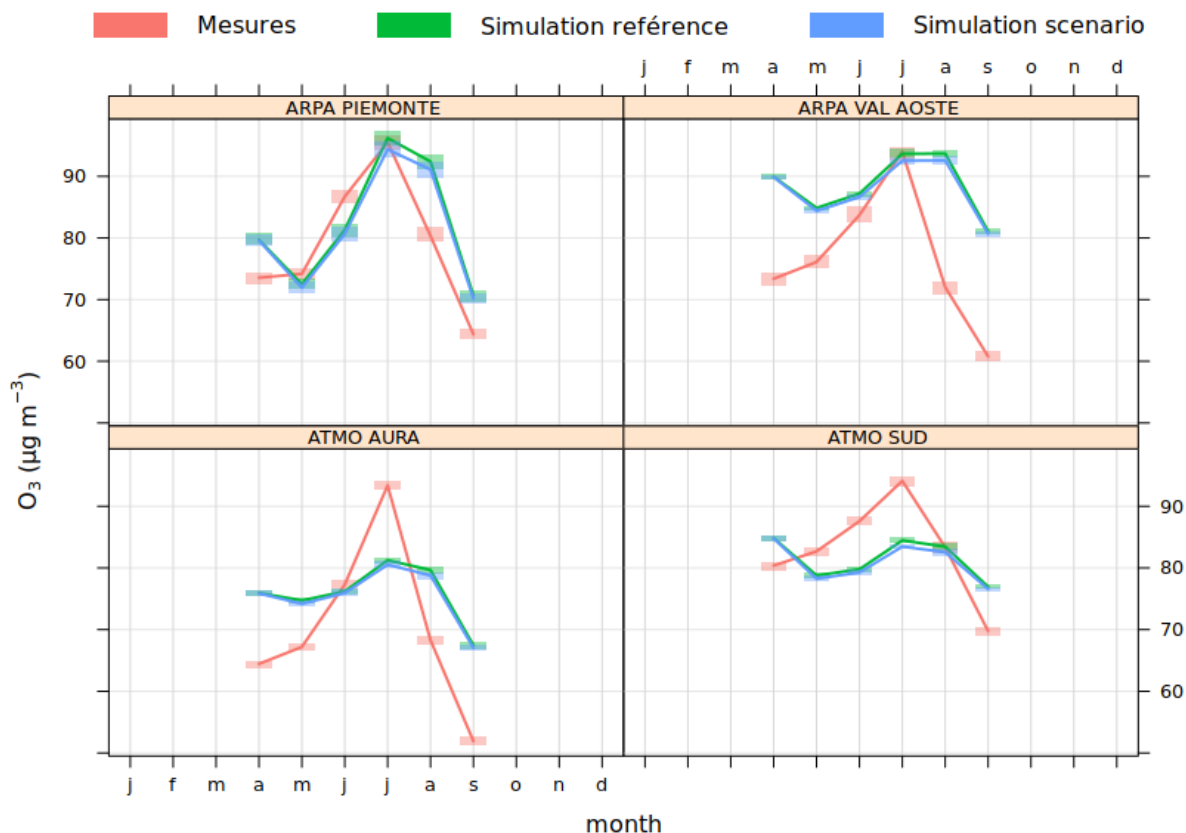


Figure 11 : Niveau d’ozone mensuel moyen ($\mu\text{g.m}^{-3}$) pour les stations (rouge) du réseau d’ARPA Piémont (en haut à gauche), d’ARPA Val d’Aoste (en haut à droite), d’Atmo AuRA (en bas à gauche) et d’Atmo Sud (en bas à droite) ainsi que valeurs issues des points de grilles correspondant pour les simulations CHIMERE REFERENCE (vert) et SCENARIO (bleu).

Les valeurs du pic de la saison d’ozone (juillet) sont sous-estimées par les deux simulations CHIMERE au niveau des stations des réseaux d’Atmo AuRA et d’Atmo SUD, ce qui n’est pas le cas au niveau des stations des réseaux d’ARPA Piémont et Val d’Aoste où les valeurs moyennes sont plutôt bien représentées par le modèle CHIMERE. De manière générale, les concentrations en début et fin de saison d’O₃ (avril et septembre 2015) sont surestimées dans les deux simulations CHIMERE quelles que soit la région considérée.

Sur le Tableau 1 sont présentés les scores statistiques de comparaison entre les deux simulations et la mesure d’ozone. Ils montrent relativement peu de différences dans les statistiques aux stations. Seuls les statistiques de biais (MB, MGE, NMB) montrent une amélioration moyenne de quelques $\mu\text{g.m}^{-3}$ dans la simulation CHIMERE qui utilise le rayonnement satellitaire issu de SARAH-3.

Tableau 1 : Statistiques de comparaison model mesure horaire des stations ALCOTRA entre la simulation REFERENCE et SCENARIO (basé sur un total de 110132 observations horaires). Avec FAC2 = Fraction des concentrations modélisées comprises dans un intervalle de 0.5 à 2 par rapport à l’observation, MB = Mean Biais ou biais entre le model et la mesure, MGE = Mean Gross Error ou biais absolue, NMB = Normal Mean Bias ou biais relatif normalisé entre le model et la mesure, NMGE = NMGE ou biais relatif moyen absolue, RMSE = Root Mean Square Error, r = coefficient de corrélation.

Simulation	FAC2	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
Référence	0,85	4,21	24,13	5,5%	0,32	30,65	0,46
Scénario	0,85	3,63	24,09	4,8%	0,32	30,54	0,46

Ces comparaisons montrent relativement peu de différences dans les statistiques globales et donc d’apport du rayonnement solaire satellitaire (apport relatif à la différence de rayonnement entre le rayonnement issu du modèle WRF et les données satellitaires SARA3). Cependant à l’échelle horaire, il existe bien des différences significatives entre les deux simulations. Sur la Figure 12, la différence de concentration horaire [(SCENARIO-Mesures)-(REFERENCE-Mesures)] aux stations de mesures est représentée. Lorsque cette différence est :

- **positive** : l’erreur de la simulation SCENARIO est plus importante que l’erreur de la simulation REFERENCE donc **le SCENARIO dégrade le résultat.**
- **négative** : l’erreur de la simulation SCENARIO est inférieure à l’erreur de la simulation REFERENCE donc **le SCENARIO améliore le résultat.**

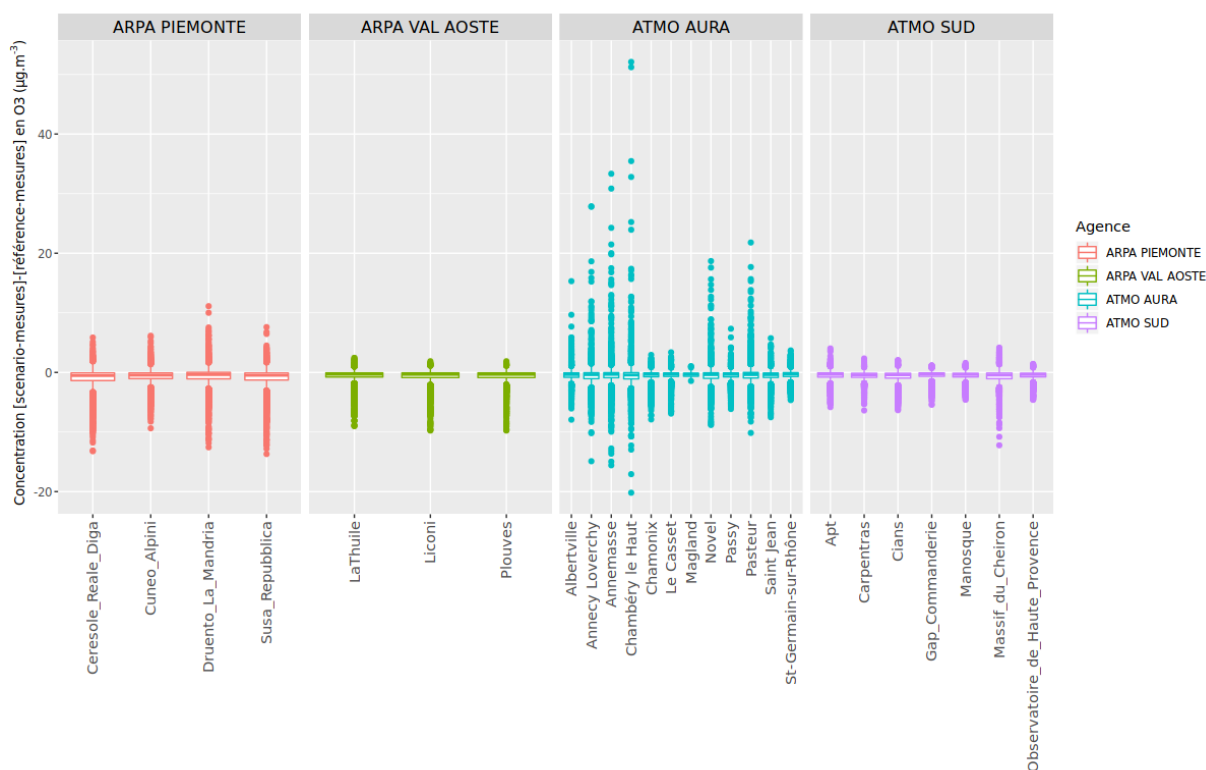


Figure 12 : Boxplot des différences horaires de concentrations [scenario-mesures] - [référence-mesures] d'Ozone par agence.

Les différences de concentration par Agence (AASQA et ARPA) sont légèrement négatives (moyenne par stations proche de -1) ce qui tend à montrer une diminution de l'erreur horaire par stations avec les données satellitaires. Cependant on observe aussi que les valeurs peuvent être très variables selon les régions notamment pour les stations de la région Piémont et des deux Savoie où les différences peuvent atteindre jusqu'à $40\mu\text{g.m}^{-3}$. On peut sans doute expliquer ces différences par la présence *à priori* plus importante des précurseurs d' O_3 dans certaines vallées alpines, amenant une sensibilité plus importante à la différence de rayonnement.

3. Discussions

Les faibles différences de concentration modélisées (MDA8) mises en évidence à la section 2.2 peuvent paraître surprenantes au vu du rôle du rayonnement solaire pour initier les réactions photochimiques menant à la formation de l'ozone. Néanmoins, ces résultats sont

cohérents avec ceux d'Otero *et al.* (2018), qui ont mis en évidence les relations (à l'aide de régression linéaire multiples) entre la concentration journalière d'ozone (MDA8) et différents facteurs météorologiques au printemps et en été à l'échelle de l'Europe à l'aide d'observations et de sorties de modèles de chimie-transport tels que CHIMERE. Dans cette étude, la part de la variance du MDA8 moyen expliquée par le rayonnement solaire est de l'ordre de 5 à 10% selon la saison pour les zones correspondant à la France ou au Nord de l'Italie.

Les résultats de notre étude sont également cohérents avec ceux d'Oikonomakis *et al.*, (2018) où les auteurs ont, à l'aide d'expérience de modélisation (modèle CAMX), cherché à reproduire l'impact de l'augmentation du rayonnement solaire associé à la baisse de la pollution particulaire (observée en Europe à partir des années 1990) sur les concentrations en O₃. A partir d'augmentation du rayonnement de l'ordre de 3 à 5% (10 à 15 W.m⁻²), ces auteurs ont trouvé des différences d'O₃ modélisés assez faibles : 0,4 à 0,8 ppb, soit 0,7 à 1,5%. De façon similaire à nos résultats, ces auteurs avaient également mis en évidence des différences de concentrations plus importantes dans certaines régions d'Italie, notamment la Plaine du Pô, et ils les avaient notamment attribuées à une plus forte sensibilité au rayonnement solaire des zones présentant de plus fortes concentrations en précurseurs d'ozone. Dans nos résultats (Figure 8), on peut en effet constater de fortes différences en O₃ modélisé entre la simulation SCENARIO et la simulation REFERENCE dans la Plaine du Pô et à proximité des grandes agglomérations italiennes alors que la différence de rayonnement solaire entre WRF et SARA3 n'est pas particulièrement plus importante sur cette région par rapport aux régions voisines. Pour étudier plus particulièrement ce phénomène, nous avons calculé en chaque point de notre domaine de calcul, la corrélation temporelle entre la différence de rayonnement dans les forçages météorologiques utilisés en entrée des deux simulations et les différences de concentration en O₃ (MDA8) simulées par le modèle CHIMERE (Figure 13). On constate en effet, que la corrélation est meilleure (0.4 à 0.6) dans des zones telles que la Plaine du Pô, la vallée du Rhône et les vallées alpines (avant-pays savoyard) et à proximité de certaines grandes villes française (Nice, Chambéry, Grenoble...), qui sont toutes des zones où l'on peut s'attendre à des concentrations importantes de précurseurs en raison du trafic, des activités industrielles ou agricoles. A l'inverse, on retrouve une corrélation très faible (<0.2) entre différence de rayonnement et différence d'O₃ (MDA8) modélisé en montagne (Alpes) et en mer.

Les faibles différences de concentration en ozone modélisé et l'absence d'amélioration significative des scores aux stations n'incitent pas au développement de méthodes plus complexes pour prendre en compte le rayonnement solaire issu de données satellites dans

les méthodes de prévision ou de scénarisation des concentrations en ozone. Toutefois, il est nécessaire de signaler que ces expériences sont incomplètes et physiquement pas entièrement cohérentes, car la diminution du rayonnement solaire (dû au biais positif du modèle WRF) devrait s'accompagner par une baisse de la température et une modification du champ de vent. Ceci aurait donc un impact sur les conditions météorologiques de manière plus large et donc sur la dispersion des polluants mais aussi sur les émissions de certains précurseurs d'ozone (COV biogéniques). Ainsi, il apparaîtrait préférable d'utiliser les données satellites de rayonnement solaire comme une référence permettant de corriger et optimiser le modèle WRF (par exemple en augmentant la résolution horizontale et en modifiant les options de la physique) pour mieux simuler le rayonnement solaire. Ces modifications se répercuteraient ensuite sur la simulation des autres champs météorologiques (vent, températures, rayonnement, humidité) et serait susceptible d'influencer plus sensiblement la modélisation des concentrations en O₃.

Corrélation entre différences MDA8 et éclairement : Scénario - Référence

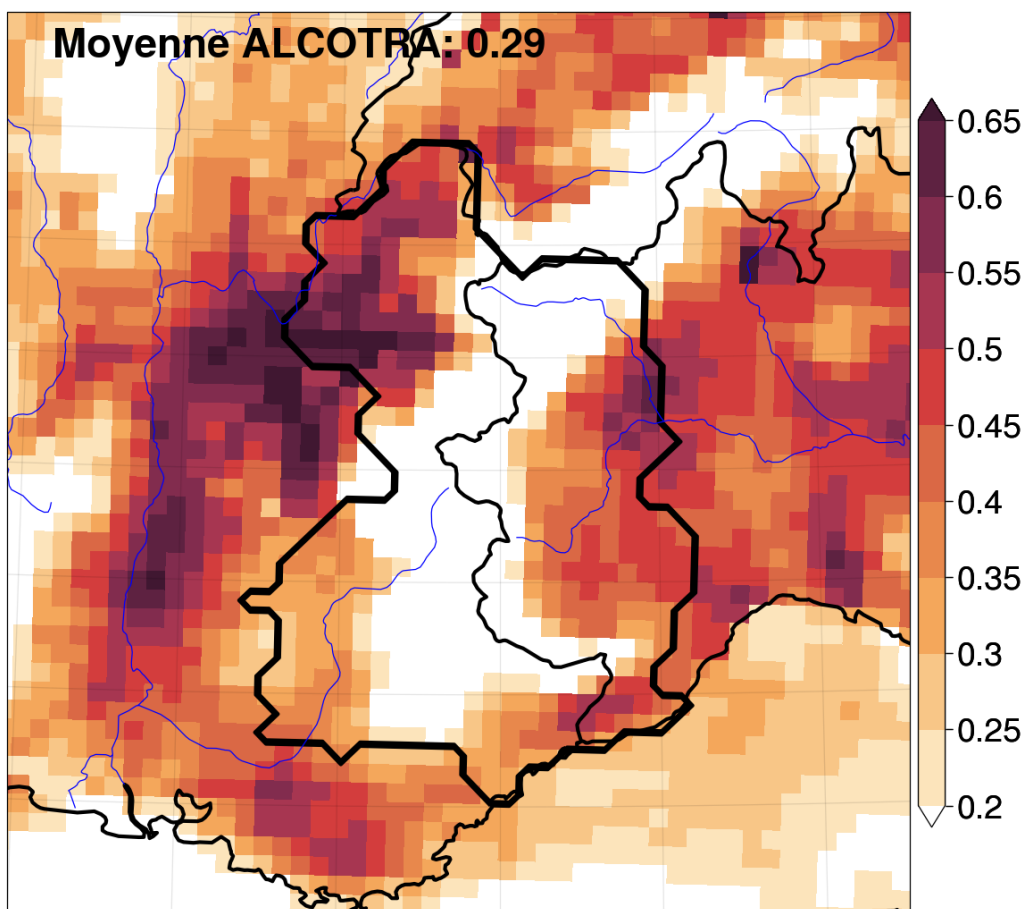


Figure 13 : Coefficient de corrélation (r) entre différences de concentration en ozone (MDA8 journalier) modélisé (SCENARIO - REFERENCE) et différence de rayonnement solaire (WRF – SARAH3) utilisé en entrée de ces simulations. Les contours de la région ALCOTRA sont affichés en noir.

4. Résumé et Conclusion

Les analyses ont montré que le modèle WRF à la résolution utilisée dans cette étude (9km) présentait un biais positif important (+40W.m⁻², soit +15% en été) par rapport aux données

satellites SARA-3 sur la zone ALCOTRA. Le remplacement des données de rayonnement du modèle WRF par les données SARA-3 de rayonnement solaire a toutefois engendré des différences relativement faibles en termes de concentration d'ozone (MDA8) modélisé avec le modèle CHIMERE: $-0.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ sur la zone ALCOTRA (soit environ 0.8%). Localement, ces différences sont un peu plus importantes, environ $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (~1.5%), notamment dans la Plaine du Po et à proximité des grandes agglomérations italiennes. Aucune amélioration significative des scores de modélisation des concentrations horaires d' O_3 aux stations n'a été constatée à la suite de l'utilisation du rayonnement solaire SARA-3. Ces résultats n'incitent pas au développement de méthode complexes pour prendre en compte le rayonnement solaire satellitaire de façon opérationnelle pour les prévisions et la scénarisation des concentrations d'ozone.

Dans cette étude, nous avons également mis en évidence que les zones présentant de fortes émissions de précurseurs d'ozone (Plaine du Pô, Vallée du Rhône...) présentaient des différences de concentrations d'ozone plus sensibles entre les deux simulations. La corrélation de ces différences d' O_3 avec les différences de rayonnement localement montre cette sensibilité, ce qui est cohérent avec les résultats d'études précédentes. Deux enseignements positifs peuvent être retenus de cette étude: d'abord les résultats suggèrent de manière générale qu'une éventuelle poursuite de l'augmentation du rayonnement solaire, notamment en raison d'une baisse de la pollution particulaire aurait un impact limité sur les concentrations en ozone. Par ailleurs, ils incitent également à faire baisser les concentrations de précurseurs en ozone, car outre le fait que cela contribue (en général) à faire diminuer la production d'ozone, cette étude suggère que cela fait également baisser la sensibilité des concentrations en ozone aux variations des conditions météorologiques, telle que l'augmentation du rayonnement solaire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Pascal M., de Crouy Chanel P., Corso M., Medina S., Wagner V., Gorla S., et al.** Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique. Saint-Maurice : Santé publique France ; 2016. 158 p. Disponible à partir de l'URL : <http://invs.santepubliquefrance.fr/Dossiers-thematiques/Environnement-et-sante/Air-et-sante/Publications>
- [2] **DREAL PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR.** Plan de Protection de l'Atmosphère des Bouches-du-Rhône; 2013. 192 p. Disponible à partir de l'URL : http://www.Provence-Alpes-Côte-d'Azur.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_PPA13_version_finale_signee_17052013_cle577b2e.pdf.
- [3] **Air quality in Europe 2022a** , HTML - TH-AL-22-011-EN-Q - ISBN 978-92-9480-515-7 - ISSN 1977-8449 - doi: 10.2800/488115. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/air-quality-in-europe-2022>
- [4] **Air quality in Europe 2022b** , HTML - TH-AL-22-011-EN-Q - ISBN 978-92-9480-515-7 - ISSN 1977-8449 - doi: 10.2800/488115. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/air-quality-in-europe-2022/impacts-of-air-pollution-on-ecosystems>
- [5] **Colette, A. et al., 2015**, Is the ozone climate penalty robust in Europe ?, **Environmental Research Letters** 10(8), 084015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084015>
- [6] **Hersbach H, Bell B, Berrisford P et al**, The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.* 2020; 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [7] **Langner, J., Engardt, M., Baklanov, A., Christensen, J. H., Gauss, M., Geels, C., Hedegaard, G. B., Nuterman, R., Simpson, D., Soares, J., Sofiev, M., Wind, P., and Zakey, A.**: A multi-model study of impacts of climate change on surface ozone in Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 10423–10440, <https://doi.org/10.5194/acp-12-10423-2012>, 2012
- [8] **Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K. S., Mills, G. E., Stevenson, D. S., Tarasova, O., Thouret, V., von Schneidmesser, E., Sommariva, R., Wild, O., and Williams, M. L.:** Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8889–8973, <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>, 2015.
- [9] **Nabat, P., S. Somot, M. Mallet, A. Sanchez-Lorenzo, and M. Wild** (2014), Contribution of anthropogenic sulfate aerosols to the changing Euro-Mediterranean climate since 1980, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 5605–5611, <https://doi.org/10.1002/2014GL060798>
- [10] **Oikononakis, E., Aksoyoglu, S., Wild, M., Ciarelli, G., Baltensperger, U., & Prévôt, A. S. H.** (2018). Solar “brightening” impact on summer surface ozone between 1990 and 2010 in Europe—a model sensitivity study of the influence of the aerosol–radiation interactions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(13), 9741–9765. <https://doi.org/10.5194/acp-18-9741-2018>

- [11] OMS Europe, 2008, Health Risks of Ozone from Long-range Transboundary Air Pollution. World Health Organization Regional Office for Europe
- [12] **Orru, H., Åström, C., Andersson, C., Tamm, T., Ebi, K. L., & Forsberg, B.** (2019). Ozone and heat-related mortality in Europe in 2050 significantly affected by changes in climate, population and greenhouse gas emission. *Environmental Research Letters*, 14(7), 074013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1cd9>
- [13] **Otero, N., Sillmann, J., Mar, K. A., Rust, H. W., Solberg, S., Andersson, C., ... & Butler, T.** (2018). A multi-model comparison of meteorological drivers of surface ozone over Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(16), 12269-12288. <https://doi.org/10.5194/acp-18-12269-2018>
- [14] **Pfeifroth U, Kothe S, Drücke J, Trentmann J, Schröder M, Selbach N, Hollmann R** (2023) Surface Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 3. Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF). https://doi.org/10.5676/eum_saf_cm/sarah/v003 (dernier accès le 10/0/2024)
- [15] **Philipona, R.** (2013). Greenhouse warming and solar brightening in and around the Alps. *International journal of climatology*, 33(6).
- [16] **Solberg, S., et al.,** 2021, Long-term trends of air pollutants at national level 2005-2019, ETC/ATNI Report 9/2021
- [17] **Yang D, Perez R** (2019) Can we gauge forecasts using satellite-derived solar irradiance? *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 11:023704. <https://doi.org/10.1063/1.5087588>